



TITLE:

木材の縦引張破断面の走査電子顕微鏡による観察

AUTHOR(S):

佐伯, 浩; 古川, 郁夫; 原田, 浩

CITATION:

佐伯, 浩 ...[et al]. 木材の縦引張破断面の走査電子顕微鏡による観察. 京都大学農学部演習林報告 1972, 43: 309-319

ISSUE DATE:

1972-03-15

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/191505>

RIGHT:

木材の縦引張破断面の走査電子顕微鏡による観察

佐伯 浩・古川郁夫・原田 浩

An Observation on Tensile Fracture of Wood by Scanning Electron Microscope

Hiroshi SAIKI, Ikuo FURUKAWA and Hiroshi HARADA

目 次

要 旨	309	3.3 道管膜の破壊形態	
1. まえがき	310	3.4 あて材細胞膜の破壊形態	
2. 材料と方法	310	4. 考 察	312
3. 結 果	310	引用文献	314
3.1 仮道管膜の破壊形態		Résumé	315
3.2 柔細胞膜の破壊形態			

要 旨

木材の縦引張破壊部を走査電子顕微鏡で観察し、細胞膜の破壊形態を調べた。試料は縦引張試験した薄片および曲げまたは衝撃曲げ試験した試験体の引張側などいずれも気乾状態で縦引張破壊した材部よりとり出し、カーボンおよび金を真空蒸着して観察した。

針葉樹材の破壊部に多くみられる ささくれた破断形の 仮道管では、2 次膜中層 S_2 が裂けてとげ状を示した。一方、軸にほぼ直角に破断した仮道管では、仮道管膜を横断する破断面が観察され、 S_2 の破断面に平たんな面とひだ状の面とが認められた。

平たんな破断面は S_2 のフィブリル傾角の小さい夏材仮道管によくあらわれ、また、衝撃曲げによる破壊では増加する傾向が認められた。平たんな破断面上には粒状構造が認められたが、これはフィブリルの切断先端にカーボンと金が蒸着されて生じたものと思われる。

細胞間層 I の破断面は平滑で、2 次膜外層 S_1 はフィブリルに沿って裂けるか、または、ほぐれた状況を示した。

仮道管の側面にあらわれるせん断破壊面には S_1 の構造が認められた。

針葉樹柔細胞の膜の破断面は平滑であり、一方、広葉樹道管膜は緩傾斜のフィブリルに沿って裂けた破断面を示した。また、圧縮あて材の仮道管膜は spiral check に沿って裂け、引張あて材繊維のゼラチン層はフィブリルに直角の破断を示した。

細胞膜層の破壊形態は引張力の作用方向とその膜層でのフィブリルの方向とのなす角に影響され (Fig. 1), また、ひだ状の破断面はフィブリルの切断が微小な裂けを伴いつつ、こきざみに進行了破壊の伝播経過を示していると考えられる (Fig. 2)。

1. ま え が き

木材の破壊部分の顕微鏡観察は、木材を構成する細胞が外力を受けてどのように挙動するかを知る一つの手掛りをあたえるものであり、木材の構造と機械的性質との関係を研究する上で重要であるが、同時に細胞膜の構造と性質についての新たな知見をもたらすことも期待される。

これまでの観察^{1,2)}により、針葉樹材の縦引張破壊部には種々の形態の細胞の破断と細胞相互間の分離が認められ、正常材の仮道管ではその分離が2次膜外層 S_1 と中層 S_2 との境界付近で生ずるとされている。しかし、これらの結果は、主として、光学顕微鏡による細胞側面からの観察と破壊部の横断面の透過電子顕微鏡観察によるもので、レプリカ法による破壊面の観察も行なわれたが³⁾、レプリカ作製が困難で、細胞膜の破壊形態の詳細をあきらかにすることはできなかった。

近年、走査電子顕微鏡の性能が向上して細胞膜の微細構造をかなりの精度で追究できるようになってきた。KORÁN⁴⁾ はこれを半径方向の引張による破壊面の観察に用いて成果を得ている。

縦引張破壊部のようにささくれのある凹凸のはげしい表面の観察には走査電子顕微鏡が適しており、今回これを使用して、これまでの手段では観察できなかった細胞膜の破断面の構造などについて知見を得ることができたので報告する。なお、その概要は第21回日本木材学会大会(1971年4月)において発表した。

また、本研究は昭和45年度文部省科学研究費により実施したものである。

2. 材 料 と 方 法

試料としては厚さ150~250 μ の板目およびまさ目の切片を気乾状態で縦引張試験(島津オートグラフIM-100型機による)したもの、および、同様に気乾状態で曲げ試験あるいは衝撃曲げ試験を行なった試験体(2×2×30 cm, まさ目面荷重, アムスラー型木材万能試験機による)を用いた。

観察した樹種は主として針葉樹3種, アカマツ, スギおよびヒノキであるが、これに広葉樹としてシオジ, 異常材としてスギとポプラのあて材についての観察をつけ加えた。

試料の引張破壊部から小片を切り出し、試料載台上に繊維方向が平面に対して約45°~90°にとりつけ、破壊部先端を上方から観察できるようにした。破壊部は凹凸がはげしいので、はじめに回りこみのよいカーボン蒸着したのち金を蒸着した。加速電圧は10 kvとしたが、観察中ある程度のcharge upが生ずることはさけられなかった。使用した装置は日本電子JSM-U3走査電子顕微鏡である。

3. 結 果

3.1 仮道管膜の破壊形態

針葉樹材の縦引張破壊部には仮道管を二分する引張破断と、仮道管の側面に沿ったせん断破壊が生じているので(Plate 1), それぞれについて仮道管膜の破壊形態をのべる。

仮道管の引張破断部では各膜層の種々の破断形態がみられる^{1,2)}。仮道管膜破断の一つの型は S_2 のフィブリルの走向に沿って破断しているもので、この型では多くの場合 S_2 が引き裂けてと

げ状となり、ささくれた形態を示す(Plate 2)。2次膜内層 S_3 は S_2 の裂けに沿って破断し、外側の S_1 はほぐれた状態となっている。

今一つの型は仮道管膜を横切った破断を示すもので、仮道管膜の破断面の構造を観察することができる。Plate 3 はスギの夏材仮道管の破断面を示したものであるが、 S_2 の破断面には平たんな部分とひだ状の模様を示している部分が見られる。

S_2 の平たんな破断面はフィブリル傾角の小さい夏材仮道管にあらわれることが多い。Plate 4 にその典型的な例を示した。これを拡大すると表面に粒状の構造が観察される(Plate 5)。粒子の直径はおおむね $400\sim 600\text{\AA}$ で、大きいものは 1000\AA を越える。これはフィブリルの切断先端を示すと思われるが、かなりの厚さ (200\AA 以上) のカーボンと金の蒸着膜が表面をおおっているもので、真の大きさ・形状を示しているものではない。

ひだ状の破断面は春材・夏材のどちらにも多くあらわれる(Plate 6, 9, 10)。ひだは仮道管膜をやや斜めに横切って多数形成されるが、その方向は同一細胞内でも種々に変化する。Plate 6 はアカマツの夏材で放射状のひだの例を示す。ひだの表面では Plate 5 と類似の粒状構造が認められ、同様にフィブリルの切断が生じていると考えられる。また、ひだ状の破断からささくれた膜破断(Plate 2)への種々の中間的破断形態が観察される。薄膜の春材仮道管では軸にほぼ直角に膜の破断が生ずることが多いが^{1,2)}、 S_2 が平たんな破断面を示すことはほとんど認められなかった。これらの仮道管では S_2 はひだ状の破断面を示すか、細かなささくれ状の破断を示した(Plate 7)。

衝撃曲げ試験体の引張側破壊部にみられる仮道管膜の破壊形態は静的試験のそれと基本的には同じであるが、夏材仮道管において、平たんな破断面が多少とも多く生ずる傾向が認められた(Plate 8)。

S_1 および S_3 はフィブリルの走向に沿って裂けた破断を示す。膜層の破断ではフィブリルの切断とフィブリル間の裂けを考えなければならないが、これらの膜層はフィブリル傾角が大きいので、引張破断面には裂けた面があらわれる。また Plate 3 および 4 にみられるように、細胞間層 I を含む細胞のコーナーの破断面は平滑である。

せん断破壊が生じて引き抜けた仮道管は夏材に多くあらわれるが^{1,2)}、その側面は S_1 の構造を示す(Plate 9)。Plate 9 では仮道管の引き抜けた跡の面もみられるが(矢印)、同様に S_1 の構造を示すので、せん断破壊による分離が S_1 内で生じていることがわかる。仮道管の側面に S_2 があらわれる場合もみられるが局所的なものである。

3.2 柔細胞膜の破壊形態

針葉樹材の軸方向柔細胞の破断面はきわめて平滑で、仮道管膜のそれと対照的である(Plate 10)。細胞のコーナーにおける I の破断面と軸方向柔細胞膜のそれが連続し、膜層の区分もあきらかでない。

放射柔細胞の半径膜の破断面も同様に平滑である(Plate 11)。半径膜、水平膜および接線膜のいずれの破断面においても膜層およびフィブリルの走向構造があきらかでない。

3.3 道管膜の破壊形態

広葉樹材については観察数が少ないので、ここでは道管膜の破断面のみを示す(Plate 12)。これはシオジの道管膜であるが、フィブリルに沿って裂けた面があらわれており、ささくれは小さく目立たない。この道管では2次膜各層のフィブリル傾角がきわめて大きいことがうかがわれる。

繊維細胞膜の破断は針葉樹仮道管のそれに類似するが、ささくれる場合が多い。ひだ状の破断

面は同様に認められるが、平たんな破断面はほとんど認められなかった。柔細胞（軸方向および放射方向）の破断面はおおむね平たんであった。

3.4 あて材細胞膜の破壊形態

あて材細胞膜の異常な構造はその破壊形に影響する³⁾。圧縮あて材仮道管の破断面 (Plate 13) では、 S_2 の spiral check に沿った裂けと、rib を横切る破断とが生じている。その破断面には粒状構造がみられ、ささくれは少ない。

これに対して引張あて材のゼラチン繊維の破断面 (Plate 14) では、ゼラチン層が少し引き抜けた状態で破断しているが、ささくれは少なくほぼ平たんな破断面となっている。その表面にはフィブリルの切断による先端の粒状構造が観察される。外側の S_2 の破断もささくれないで平たんな破断面を示している。

4. 考 察

細胞膜の破壊形態については各膜層における骨格物質セルロース・マイクロフィブリルの性質とその配向、matrix および充填物質の性質と、これら構成物質の含有量・分布などに関連して考える必要がある。

骨格物質のセルロースは分子鎖の方向とそれに直交する方向とではそのヤング係数や強度が異なり、分子鎖方向の値が著しく大きいことが知られている⁵⁾。したがって一つの膜層を考えた場合、その膜層内でのセルロース・マイクロフィブリルの配向方向と引張力の作用方向との関係が破断形態に影響すると考えられる。これらの関連を模式的に示したものが Fig. 1 である。

フィブリルが引張力の作用方向にほぼ平行であるときは、フィブリルの切断によって、それにほぼ直角に破断が生ずるであろう (Fig. 1a)。破断面は平たん、表面にはフィブリルの切断先端

があらわれる (Plate 5 の粒状構造)。夏材仮道管 (Plate 4) および引張あて材繊維のゼラチン層にみられた平たんな破断面 (Plate 14) がこれに相当する。

これに対して引張力作用方向とフィブリルとの角度が大きいときは、はじめフィブリル間に裂けが生じ、それがフィブリルに沿って進行したのち、フィブリルが切断すると考えられる (Fig. 1d)。 S_1 (Plate 3 および Plate 9)、圧縮あて材仮道管 (Plate 13) および道管膜 (Plate 12) の破断がこの型に相当する。

引張力の作用方向とフィブリルとのなす角が上記の中間にあるときは、フィブリル間の裂けとフィブリルの切断とが複雑に組み合わさった破断が生ずる。裂けが支配的なときはささくれた破断 (Fig. 1c) となり、裂けが少ないときはひだ状

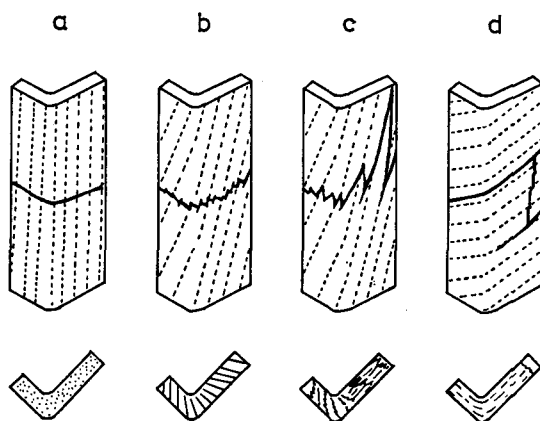


Fig. 1. A schematic diagram showing that the tensile fracture type of a cell wall layer would depend on the angle between the direction of tensile load and the fibrillar orientation of the layer. The cross fracture with the flat face (a), that with the ridgy face (b), the steep helical fracture or the splintering fracture (c) and the flat helical fracture (d).

の破断 (Fig. 1b) となると考えられる。

ひだ状の破断はフィブリル間の裂けとフィブリルの切断が交互にこきざみに進行して生じたものと推測できる。すなわち、細胞膜のある場所でフィブリルの切断が生じ、それが伝播する場合、きわめて短時間内に進行するのではあるが、微視的には裂けと切断が交互に生じて伝播して行くことが考えられる (Fig. 2)。破断面にみられるひだ状模様はこのようなこきざみの破断の一つとその進行の経過を示していると考えられる。これは木材細胞膜における unstable fracture⁶⁾ の進行の一つの特徴的パターンであろう。

以上述べた膜のフィブリルの配向方向と破断形態との関係は模式的なものであって、実際に a~d の型とフィブリル傾角とを対照して定量的に確かめるまでには至っていない。a の型はスギの夏材仮道管に多くみられたが、その試料の S_2 のフィブリル傾角は非常に小さく平均約 3° であった (ヨース沈着法による測定)。また、衝撃曲げ試験を行ない、引張側の破壊部を観察すると、夏材ではこの型の破断が増加する傾向が認められた。破壊の進行速度が早いことが、ひだ状の破断の形成、すなわち、裂けと切断が交互におこることを抑制して、切断のみの進行を容易にしたものと推測される。

平たんな破断面にみられる粒状構造はフィブリルの切断先端を示すものとして興味もたれるが、その真の形態を知るためには透過電子顕微鏡による観察が必要である。

次に、細胞のコーナーの細胞間層 I は平滑な破断面を示した。この部分はほとんどリグニンからなると考えてよいから⁷⁾、この平滑な破断面は非結晶性で等方性のリグニンの性質によるものと考えられる。一方、針葉樹材の軸方向柔細胞および放射柔細胞もまた平滑な破断面を示した (Plate 10, 11)。スギの放射柔細胞の2次膜には細胞軸に平行の S_2 と $30^\circ \sim 60^\circ$ の角度をなす S_1 と S_3 が認められている⁸⁾。放射柔細胞が Plate 11 のように半径膜で上下に二分したとき、破断面には S_2 のフィブリル間の裂けと S_1 と S_2 のフィブリルの破断があらわれることになるが、写真にみられるように平滑であり、細胞のコーナーの I の破断面と連続していて、膜層の区分もフィブリルの走向構造も認められない。フィブリルに沿って裂けた場合でも道管膜ではフィブリルの走向構造が観察されるから (Plate 12)、針葉樹の柔細胞膜の破断面がこのように平滑となるのは、恐らくこれらの細胞膜においてリグニン含有量が高いこと⁸⁾ によるものであろう。

針葉樹あて材の S_2 は正常材よりもリグニン含有量が高いと考えられるが⁹⁾、その破断面は小さく裂が少なく、同様に高リグニン含有量が影響していることがうかがわれた。反対に広葉樹あて材繊維のゼラチン層はリグニンをほとんど含まないが^{10, 11)}、破断の際にゼラチン層のフィブリルがほぐれてばらばらになるような状況はみられず、また、外側 S_2 との境界で剥離する傾向も認められなかった (Plate 14)。引張あて材の引張強度は乾燥状態では著しく高いが、これは乾燥によってゼラチン層と他の膜層との結合が強まるためと考えられている¹²⁾。前述した破断状況もやはりゼラチン層内におけるフィブリル間の結びつきならびにゼラチン層と他層との間の結合がかなり強いことを示しているように思われる。

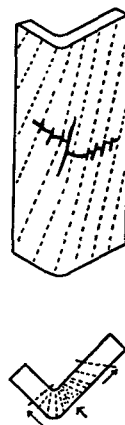


Fig. 2. A schematic diagram showing that the ridgy face may be a trace of the fracture propagation crossing the wall throughout. The scission of fibrils would proceed with a short and quick jump, accompanying a minute split between fibrils.

細胞の側面にあらわれるせん断破壊が S_1 内で生じている例を Plate 9 に示した。これについて Mountain ash (*Eucalyptus regnans*) では縦引張破壊は S_1 と S_2 の境界で¹³⁾, Eastern redcedar (*Juniperus virginiana*) では S_1 内で⁵⁾ 生ずると報告されている。また、佐伯は透過電子顕微鏡観察により、アカマツ、スギおよびヒノキでは S_1 内で S_2 との境界に近接して破壊し、それが S_1 - S_2 境界に沿った破壊に移行することが多いとし、 S_1 内および S_1 - S_2 境界の破壊の双方を認めている^{1,2)}。走査電子顕微鏡によって、はるかに多数の細胞について観察できたが、これらの針葉樹材では破壊によってあらわれた仮道管側面はほとんどの場合 S_1 の構造を示し、 S_2 の構造が認められるのは局部的であった。

広葉樹材については観察数が少なく十分な論議ができない段階であるが、針葉樹材よりも変化が多いように思われた。それは構成要素の種類が多いこととともに、同一要素であってもフィブリルの配向や成分分布など細胞膜の構造にかなりのばらつきがあって、それが破壊形態に反映しているように思われる。

細胞膜の破壊形態と膜の構造との関連を考えるためには、破壊部にあらわれる膜の構造が詳細に観察されねばならない。より微細な構造の観察には透過電子顕微鏡を用いなければならないが、走査電子顕微鏡はその試料作製が容易で、比較的多数の試料について、破壊部の全体を立体的に把握できるとともに、破壊した膜の構造をある程度まで明確にできる。従って破壊形態の研究にはきわめて有用であり、今回の観察によって細胞膜の破断面について新たな知見を得ることができた。

引用文献

- 1) 佐伯 浩：針葉樹材における構造の年輪内変移に関する研究，京都大学学位論文 (1968)
- 2) SAKI, H.: Influences of wood structure on radial variations in some physical properties within an annual ring of conifers, Memoirs of the College of Agriculture, Kyoto Univ. **96**, 47-73, (1970)
- 3) 古野 毅・佐伯 浩・原田 浩：縦引張破壊した圧縮材材仮道管の構造，木材学会誌，**15** (3), 104-108, (1969)
- 4) KORÁN, Z.: Electron microscopy of radial tracheid surfaces of Black spruce separated by tensile failure at various temperatures, Tappi **50** (2), 60-67, (1967)
- 5) MARK, R.: Cell Wall Mechanics of Tracheid, Yale Univ. Press. New Haven (1967)
- 6) DEBAISE, G. R., PORTER, A. W. and PENTONEV, R. E.: Morphology and mechanics of wood fracture, Materials Res. and Standards **6** (10), 493-499, (1966)
- 7) FERGUS, B. G., PROCTER, A. R., SCOTT, J. A. N. and GORING, D. A. I.: The distribution of lignin in spruce wood as determined by ultraviolet microscopy, Wood Sci. and Tech. **3**, 117-138, (1969)
- 8) HARADA, H. and WARDROP, A. B.: Cell wall structure of ray parenchyma cells of a softwood (*Cryptomeria japonica*), 木材誌，**6** (1), 34-41, (1960)
- 9) CÔTÉ, W. A. Jr., DAY, A. C. and TIMELL, E.: Distribution of lignin in normal and compression wood of Tamarack, Wood Sci. and Tech. **2**, 13-37, (1968)
- 10) 古屋信子・高橋 敏・宮崎 信：*Populus euramericana* の引張材でゼラチン層の化学成分，木材誌，**16** (1), 26-30, (1970)
- 11) 原田 浩・谷口 謙・喜志峻雄：*Populus euramericana* の引張材で材のゼラチン層の構造，京大農演習林報告 **42**, 221-227, (1971)
- 12) PANSIN, A. J. and DE ZEEUW, C.: Textbook of Wood Technology, Vol. 1. 2nd ed. McGraw-Hill, N. Y. (1964)
- 13) WARDROP, A. B. and ADDO-ASHONG, F. W.: The anatomy and fine structure of wood in relation to its mechanical failure, Proc. Melbourne Univ. Eng. Dept. Symp. on Fracture (1963)

Résumé

Wood pieces broken in tension parallel to the grain in the air-dried condition were examined by a scanning electron microscope to study the structural features of ruptured cell walls. Samples to be observed were taken both from the broken end of microtensile specimens and from the tensile side of beams broken in a bending or impact bending test. The samples were coated with carbon and gold evaporated under high vacuum. Softwood samples were mainly used in this study, while additional observations were made on hardwood ones.

In the broken tracheids showing the splintering fracture type, the ruptured S_2 had sharp splinters (Plate 2). In those tracheids showing the cross fracture type, the fracture crossed the wall nearly perpendicular to the tracheid axis, so that the cross fracture surface of the wall layers could be observed on the broken end of the wall. The cross fracture surface of S_2 showed two characteristic features: the flat face and the ridgy face (Plate 3). The flat face was found particularly in S_2 of latewood tracheids with the steep helical angles. On the flat face a granular appearance could be seen at high magnification (Plate 5), which was considered to be the broken ends of fibrils coated with carbon and gold. The impact bending test had a tendency to increase the occurrence of the flat face fracture in latewood tracheids (Plate 8). In earlywood, however, the flat face fracture could be hardly found even in the broken tracheids showing the cross fracture type. In those tracheids the broken end of S_2 had the ridgy face of the cross fracture type or the fine splinters of fibrils (Plate 7).

The cross fracture surface of the intercellular layer at the cell corner appeared flat and smooth. S_1 was split along its fibrillar orientation. The loosened and brushy fibrils of S_1 were also found frequently in the split cell walls. Splitting and scission of S_3 fibrils appeared to follow the break of the adjacent S_2 .

The intercellular separation also occurred in tension, especially between latewood tracheids. Both the side face of separated tracheids and the inner face of the remainder of a wall showed the fibrillar structure of S_1 , indicating shear failure within S_1 (Plate 9).

Axial and ray parenchyma cell walls of softwood broken in axial tension had the brash fractures with flat and smooth face much the same as the intercellular layer (Plate 10, 11). The smooth face of ruptured cell walls would be due to a high lignin contents in them. The vessel wall with the flat helix was split along the fibrillar orientation (Plate 12). The wall of the compression wood tracheid was split along its spiral check (Plate 13), and the gelatinous layer in tension wood fibers was severed perpendicular to its fibrils, resulting in the cross fracture with flat face (Plate 14).

The fracture type of a cell wall layer by the tensile load seems to depend on the angle between the direction of the load and the fibrillar orientation of the layer. As explained in a schematic diagram Fig. 1, the tensile load with a larger angle to the fibrils of the layer would make the fibrils separate laterally, resulting in a flat helical fracture (Fig. 1d). The tensile load nearly parallel to the fibrils would cause the scission of fibrils perpendicular to them, leading to the cross fracture with the flat face. With a medium angle between the two the lateral separation and scission of fibrils would be combined in various way, resulting in transitive types of the fracture. A typical one of them is the steep helical fracture i. e. the splintering fracture (Fig. 1c) and another is the cross fracture with the ridgy face (Fig. 1b). It is also considered that the ridgy face may be a trace of the fracture propagation advancing the wall throughout, in which the scission of fibrils would proceed with a short, quick jump accompanying a minute split between fibrils (Fig. 2).

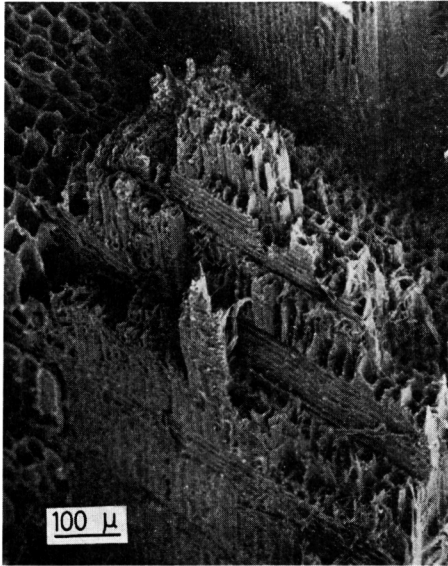


Plate 1. Tensile fractures in the tensile side of a beam of *Cryptomeria japonica* D. Don broken in a bending test (load on radial face). The broken tracheids of the cross fracture type can be seen both in earlywood and in latewood. The splintering fracture and the intercellular separation are mostly found in latewood tracheids.

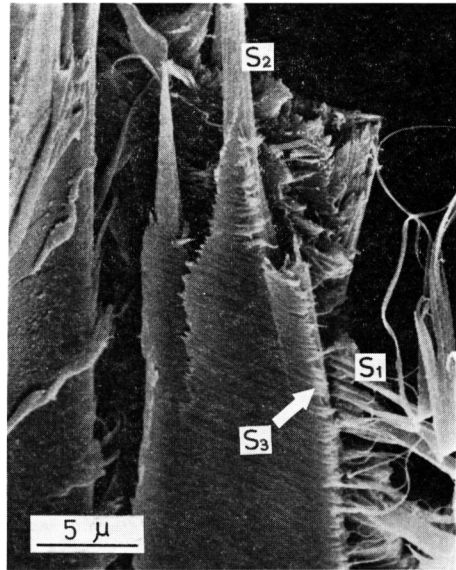


Plate 2. The splintering fractures of the tracheid walls in earlywood of *Pinus densiflora* Sieb. et Zucc. (bending test beam). The ruptured S_2 has sharp splinters. The loosened S_1 fibrils look brushy and the failure of S_3 fibrils appears to follow the break of the adjacent S_2 .

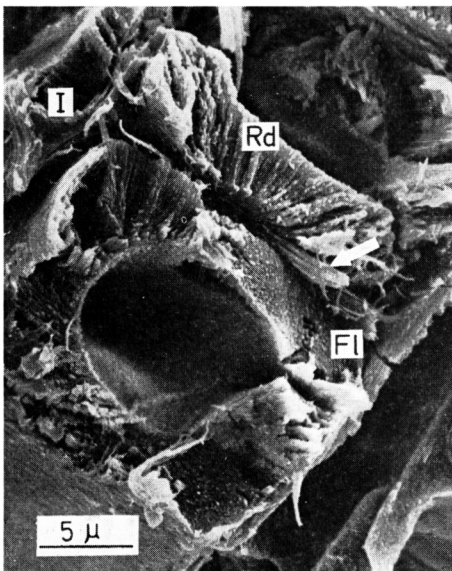


Plate 3. The cross fractures of the tracheid walls in latewood of *Cryptomeria japonica* D. Don (microtensile test specimen). The flat face (Fl) and ridgy face (Rd) can be seen on the cross fracture face of S_2 . The intercellular layer at the cell corner (I) has a smooth fracture face and S_1 is split along its fibrils (arrow).

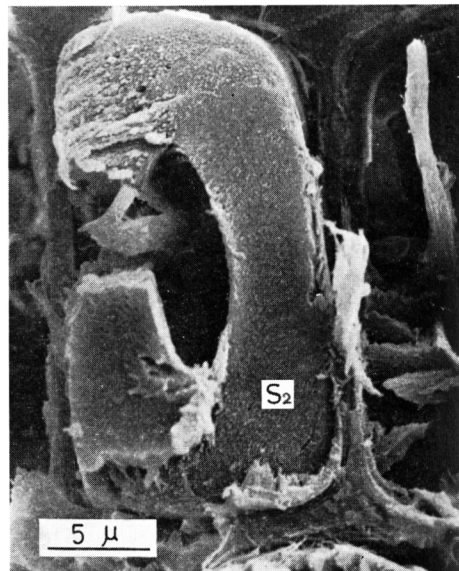


Plate 4. A typical flat face of S_2 in a latewood tracheid of *Cryptomeria japonica* D. Don (bending test beam).

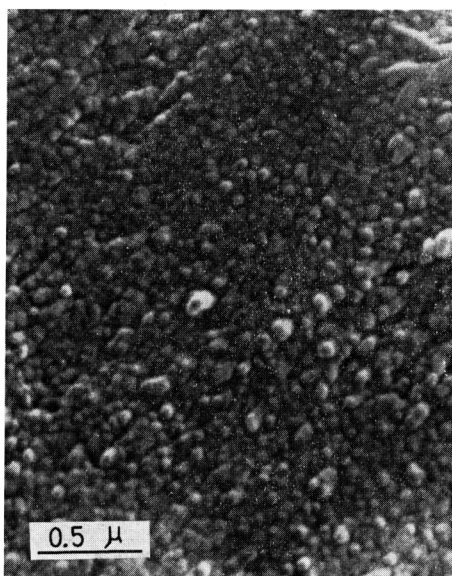


Plate 5. A highly magnified view of the flat face shown in Plate 4. The granular appearance probably results from coating with carbon and gold over the broken ends of fibrils.

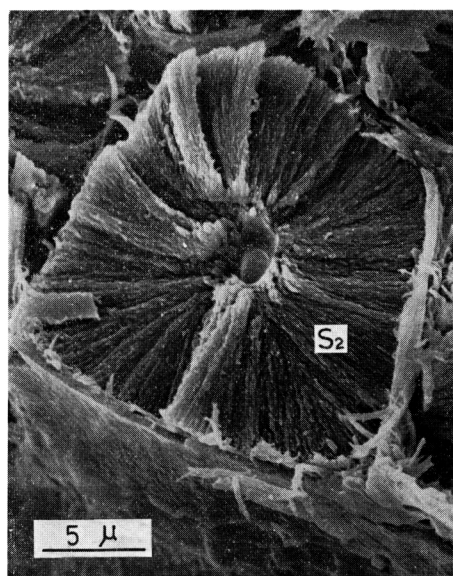


Plate 6. A typical ridgy face of S_2 in a latewood tracheid of *Pinus densiflora* SIEB. et ZUCC. (microtensile test specimen).

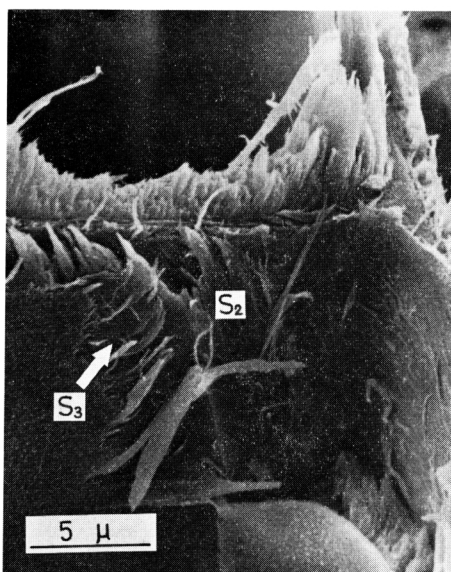


Plate 7. The ruptured earlywood tracheids of *Pinus densiflora* SIEB. et ZUCC. (bending test beam) showing the cross fractures with fine splinters of S_2 fibrils.

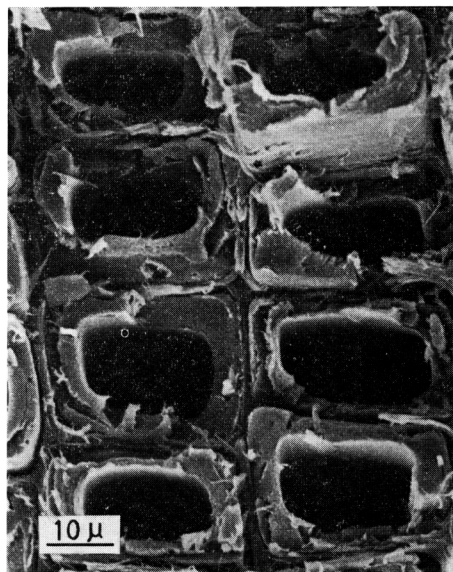


Plate 8. Latewood tracheids showing the cross fracture type with the flat face, found in the ruptured part of an impact bending beam of *Cryptomeria japonica* D. DON.

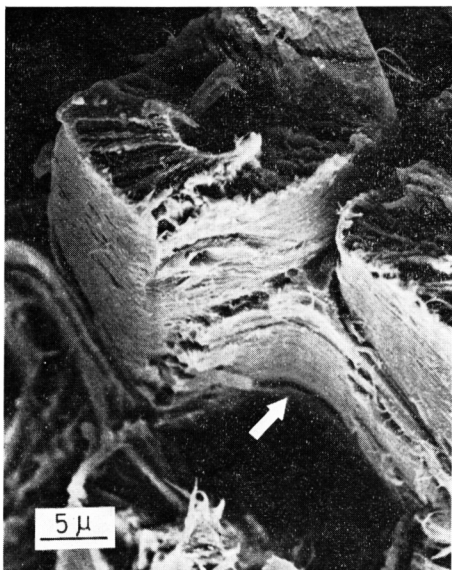


Plate 9. Intercellular separation between latewood tracheids of *Cryptomeria japonica* D. DON (microtensile test specimen). The side face of separated tracheids and the inner face of the remainder of the wall (arrow) show the fibrillar structure of S_1 . The ridgy face of S_2 also can be seen on the broken ends of tracheids.

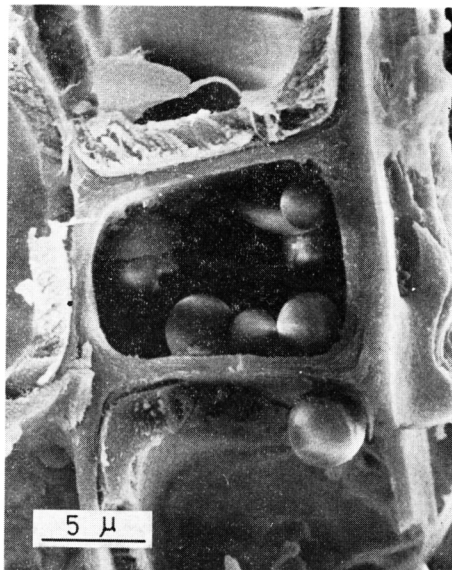


Plate 10. An axial parenchyma cell of *Cryptomeria japonica* D. DON (microtensile test specimen). The ruptured wall has the flat and smooth face.



Plate 11. A ray parenchyma cell of *Cryptomeria japonica* D. DON (microtensile test specimen) split along the cell axis. The radial walls split also have the flat and smooth face.

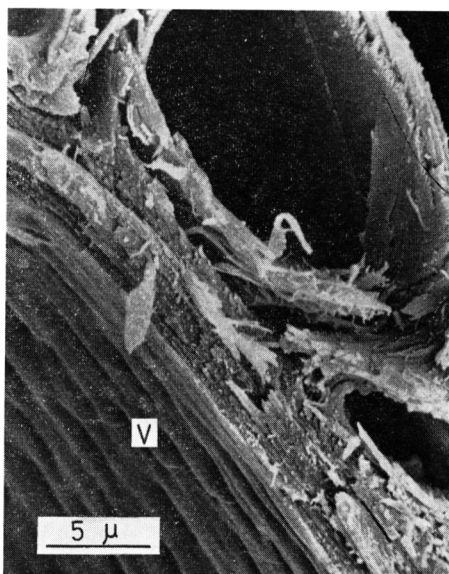


Plate 12. The ruptured vessel wall (V) of *Fraxinus spaethiana* LINGELSH (bending test beam). Vessel wall is split along its flat helix of fibrils.

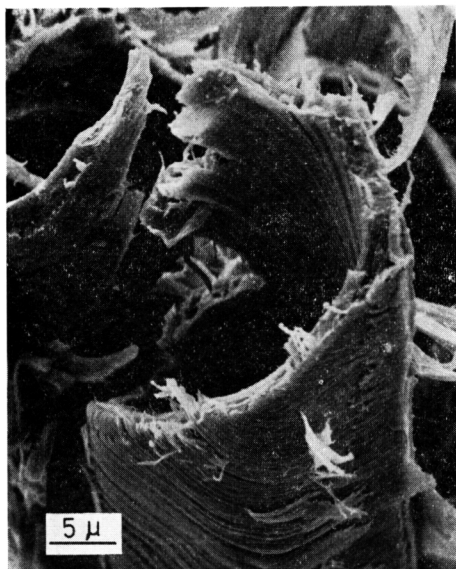


Plate 13. The broken end of a compression wood tracheid of *Cryptomeria japonica* D. DON, showing the splitting along the spiral checks in the wall and the cross scission of wall ribs (microtensile test specimen).

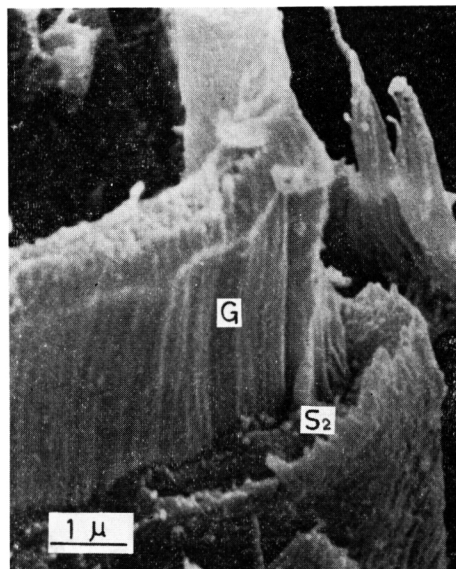


Plate 14. The broken end of a gelatinous fiber in tension wood of *Populus euramericana* (microtensile test specimen). The gelatinous layer is severed perpendicular to the direction of fibrillar orientation, and the S_2 also shows the cross fracture with the flat face.